

高機能デバイス創生に向けた Ge 低次元ナノ構造体の形成

著者	安田 康佑
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	87
号	1
ページ	238-239
発行年	2018-08
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123521

修士学位論文要約（平成30年 3 月）

高機能デバイス創生に向けた Ge 低次元ナノ構造体の形成

安田 康佑

指導教員：鷲尾 勝由， 研究指導教員：川島 知之

Formation of Ge Low-dimensional Nanostructures for Highly Functional Device

Kosuke YASUTA

Supervisor: Katsuyoshi WASHIO, Research Advisor: Tomoyuki KAWASHIMA

This thesis addresses the formation of Ge quantum dots (QDs) on a Si(100) substrate and germanene on an insulated substrate for highly functional devices. The effects of C coverage on Ge QDs formation by using C-Si reaction was investigated. With a C coverage of 0.25 – 0.50 monolayer (ML), QDs were formed in the Volmer-Weber (VW) mode on c(4×4) reconstructed surface. In the case for 0.75 – 2.0 MLs, the diameter of QDs decreased and the density increased accordingly. The smallest QDs had a diameter of 9.5 nm and a density of $8.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ at 2.0 MLs in the Stranski-Krastanov (SK) mode. This is because the interfacial energy was decreased by the formation of C-Ge bonds near the Ge/Si interface. Above 2.0 MLs, QDs became larger and the transition from SK to VW mode occurred due to the decrease in surface energy by C-C (sp^2) bonds formation. The formation of germanene on graphite-like layer (G-layer) and atomically stepped c-face sapphire substrate were also studied. On the G-layer, dot-like Ge was formed but not germanene. On the other hand, germanene was formed on atomically stepped c-face sapphire substrate with Ge deposition of 2.8 – 3.2 MLs and thermal treatment at 700°C.

1. はじめに

情報化社会の発展に伴い、半導体デバイスはさらなる高機能化を求められている。微細化によらない半導体デバイス高機能化の手段として、低次元ナノ構造体の導入が注目されている。本研究では Si プロセスと親和性の高い Ge を利用した量子ドットと単原子シート（ゲルマネン）の形成について検討した。

2. Si(100)基板上の Ge 量子ドット形成^[1]

Si フォトニクスにおける光源として、Ge 量子ドットを利用した発光素子が注目されている。C-Si 結合形成により c(4×4)再構成を施した Si(100)表面での Ge 量子ドット形成法によって小粒径かつ高密度なドットが得られているが^[2]、c(4×4)構造の形成に適した 0.25 原子層 (ML)を超過して C を堆積した際のドット成長様式については詳しく検討されていない。本研究では C 堆積量がドット形成に与える効果を詳しく検討した。

試料の作製には分子線エピタキシー (MBE) 装置を用いた。200°C で C を 0–4.0 MLs 堆積し、750°C で熱処理を行い C-Si 結合形成反応を生じた後、550°C で Ge を 3 nm 厚相当堆積した。図 1 に C 堆積量 0–4.0 MLs における AFM 像を示し、図 2 にドットの粒径・密度・等価膜厚 (DET) の C 堆積量依存性を示す。DET は AFM 像に含まれる全ピクセルの高さデータの平均値であり、ドット部分の正味の膜厚を示す。C 堆積量の増加に伴いドットが小粒径・高密度化し、C 堆積量 2.0 MLs で平均粒径 9.5 nm、密度 $8.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ の最も小さく、高密度なドットを形成した。一方、2.5 MLs 以上では C 堆積量の増加に伴いドットが肥大化し

た。C 堆積量 0.25–0.50 ML での DET は 3 nm であったが、0.75 ML では 2 nm に減少した。これはドットの成長モードが Volmer-Weber (VW) モードから Stranski-Krastanov (SK) モードに遷移したことを示す。2.5 MLs で DET は再び 3 nm となり、成長モードが VW モードに遷移したことがわかった。

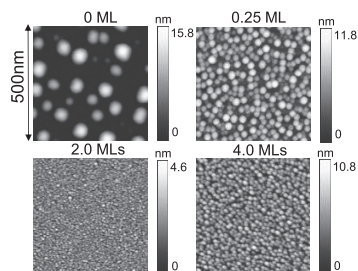


図 1 C 堆積量 0–4.0 MLs における AFM 像

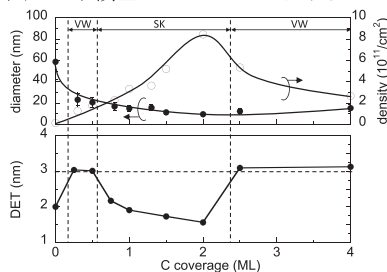


図 2 ドットの粒径・密度・DET の C 堆積量依存性

Ge 成長モード遷移の原因を調べるために、XPS を用いて C の化学結合状態を分析した。図 3(a)に C 1s

XPS スペクトルから算出した C-Si 結合と C-Ge 結合成分の積分強度の C 堆積量依存性を示す。グラフ中の実線と破線はそれぞれ過酸化水素による Ge エッチング前後の積分強度を示す。C 堆積量 0.25 - 0.50 ML では C-Si 結合の強度が大きく増加したが、0.75 ML 以上では C-Si 結合の増加率は小さくなり、エッチング後には C-Ge 結合の強度が増加した。これは 0.75 ML 以上では C-Si 結合形成に消費されない C が Ge/Si 界面付近で C-Ge 結合を形成したことを示している。以上の結果から、SK モードへの成長モード遷移は C-Ge 結合形成による界面エネルギー減少が引き起こしたと考える。図 3(b)に C 堆積量 2.0、2.5 MLs における C-Si 結合形成後の C 1s XPS スペクトルを示す。2.5 MLs において、284 - 285 eV に強いピークが現れた。これは C-C(sp²) 結合に起因するピークと考えられることから、過剰に C が堆積される領域において生じる VW モードへの成長モード遷移は、C-C(sp²) 結合の形成による表面エネルギーの減少が引き起こしたと考える。

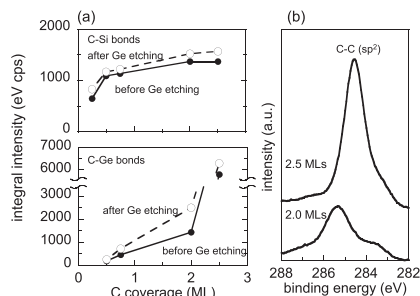


図 3 (a) C-Si 結合と C-Ge 結合成分の積分強度の C 堆積量依存性、(b) C 堆積量 2.0、2.5 MLs における C-Si 反応後の C 1s XPS スペクトル

3. 絶縁基板上的ゲルマネン形成

ゲルマネンは高い電子移動度を有し、電界印加によるバンドギャップ制御も可能であると考えられており、高速電子デバイスへの応用が期待されている^[3]。ゲルマネンの形成基板に求められる要件として、基板との相互作用によってゲルマネンのディラックコーン型バンド構造を消失しないこと、十分な絶縁性を有していることが挙げられる。本研究では Si(100)基板上に形成したグラファイトライク層上と、ステップ化 c 面サファイア基板上的ゲルマネン形成を検討した。

試料の作製には MBE 装置を用いた。グラファイトライク層は、Si(100)基板上に C を 4.0 MLs 堆積し、750°C で 10 分間熱処理を施して形成した。c 面サファイア基板は大気中 1000°C 1 時間の熱処理によりステップ化した。これらの基板に 200°C で Ge を堆積し、20 分間の熱処理を施した。ラマン分光測定用の試料には、Ge の酸化を防ぐため Si キャンプ層を 200°C で 8 nm 堆積した。図 4 にグラファイトライク層上に Ge を 1 ML 堆積し、熱処理温度を 350 - 500°C とした時の

AFM 像とラマンスペクトルを示す。Ge 堆積前のグラファイトライク層は平坦であったが、堆積した Ge は凝集し、粒を形成した。ラマン分光においては Ge に起因するピークは観測されなかった。

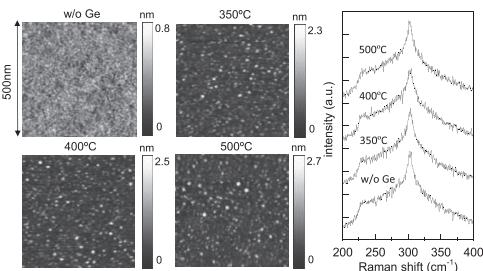


図 4 グラファイトライク層上で 350 - 500°C の熱処理を施した場合の AFM 像とラマン分光スペクトル

図 5 に c 面サファイア基板上に Ge を 2.6 - 3.4 MLs 堆積し、700°C で熱処理した時の AFM 像とラマンスペクトルを示す。Ge 堆積量 3.2 MLs 以下においてステップテラス構造が観測され平坦な膜を形成し、3.4 MLs では粒を形成した。ラマンスペクトルにおいては、2.8 - 3.2 ML で 290 - 300 cm⁻¹ にピークが現れ、Ge が粒状に成長する 3.4 MLs では当該ピークは消失した。ゲルマネン面内方向の伸長振動は 290 cm⁻¹ にピークとして現れることが報告されており^[4]、今回観測したピークはこの振動に起因すると考える。

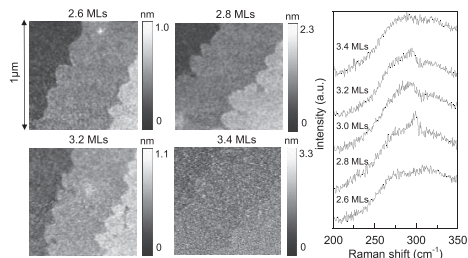


図 5 Ge 堆積量 2.6 - 3.4 MLs における AFM 像とラマン分光スペクトル

4. まとめ

高機能デバイス創生に向け、低次元ナノ構造体の形成を検討した。C-Si 反応を利用した Ge 量子ドット形成法において、C 堆積量によりドットの形状や成長モードを制御できることを示した。また、ステップ化 c 面サファイア基板上においてゲルマネン形成が可能であることを示した。

文献

- 1) K. Yasuta et al., Mat. Sci. Semicond. Proc., 70 (2017) 173
- 2) Y. Satoh et al., Thin Solid Films, 621 (2017) 42
- 3) M. E. Dávila et al., New J. Phys., 16 (2014) 095002.
- 4) E. Scalise et al., Nano Research, 6 (2013) 19